

振動モニタリングによる洗掘検知の可能性の検討

京都大学大学院 学生会員 ○吉留 一博 京都大学大学院 正会員 金 哲佑
 京都大学大学院 正会員 五井 良直 JR 西日本 正会員 近藤 政弘
 富士電機 (株) 北川 慎治 富士電機 (株) 篠田 正紀

1. 序論

現在、河川に架かる鉄道橋梁は高度経済成長期に整備・改良されたものが大半を占めており、劣化が進んでいる。鉄道橋梁の劣化および経済成長期におけるダム開発による土砂供給量の減少や大雨によって、洗掘が起きやすい橋脚が増えている¹⁾。洗掘によって、鉄道運行に支障が生じることや、最悪の場合、列車通過時に落橋による事故も考えられる。そのため、洗掘の発生有無を判定するシステムの確立が喫緊の課題である。本研究では、洗掘対策前後における鉄道橋脚の振動特性を比較することで、振動モニタリングによる洗掘検知の可能性を間接的に検討することを目的としている。

2. ベイズ推定に基づいたシステム同定

推定された振動特性の不確かさを直接的に評価することができるベイズ実動モード同定法^{2,3)} (以下、ベイズ同定)を適用する。式 (1) に示すように観測加速度は、一般化加速度 (モード応答加速度) とモードベクトルの重ね合わせで表現できる。モード応答加速度を含む一般化座標による運動方程式は式 (2) になる。

$$\ddot{x}_j = \sum_{i=1}^m \phi_i \ddot{\eta}_i(t_j) + \epsilon_j \quad (1)$$

$$\ddot{\eta}_i(t) + 2\zeta_i\omega_i\dot{\eta}_i(t) + \omega_i^2\eta_i(t) = p_i(t) \quad (2)$$

ここに、 $\ddot{x}_j$:加速度、 ϕ_i :モード形状、 $\ddot{\eta}_i$:モード応答加速度、 ϵ_j :観測誤差、 ζ_i :モード減衰定数、 ω_i :固有角振動数、 p_i :モード外力。

次に観測された加速度のFFTから尤度 $p(D|\theta)$ を得る。事前分布を一様とみなし、ベイズの定理から事後分布 $p(\theta|D)$ を得る。

3. 実橋梁振動モニタリングの概要

本研究の対象橋梁は兵庫県姫路市に位置する鉄道橋である。対象橋梁橋脚の洗掘対策前後の概観を図1に、対象橋脚の正面図を図2に示す。赤色の範囲が鉄筋コンクリートにより補強された範囲である。洗掘対策による影響で橋脚周辺の河床は破線の位置から黒線の位置まで低下している。橋脚は根入れの浅い直接基礎である。橋脚天端中心部に無線によるデータ送受信が可能な三軸方向加速度センサー (CPUKSNSS-00, 富士電機) が1基設置されている。サンプリング周波数は200Hzである。対象橋脚は2011年に衝撃振動試験が実施され、洗掘対策前の橋脚の固有振動数は15.9Hzと推定されている。



図1 対象橋脚概観 (左図:対策前, 右図:対策後)。

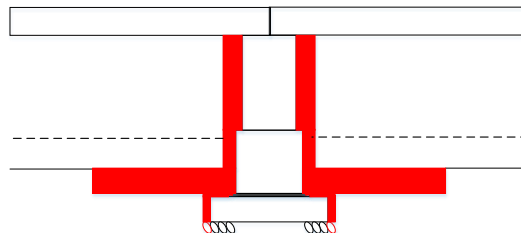


図2 対象橋脚の正面図。

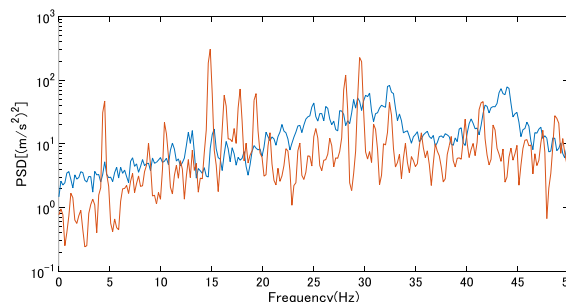


図3 対策前後の増水時の橋脚の橋軸直角方向加速度のPSD。(赤線:補強前,青線:補強後)

キーワード 鉄道橋, 洗掘, 無線センサー, 振動モニタリング, ベイズ実働モード同定

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 工学研究科社会基盤工学専攻 TEL 075-383-3421

4. システム同定

水位が上昇しているときの常時微動データにより計算される橋脚の橋軸直角方向加速度のパワースペクトル密度 (PSD : Power spectrum density) の推定値を図 3 に示す。対象橋梁の平常時のある列車加振振動を用いて同定される振動特性を表 1 にまとめる⁴⁾。本研究では、橋脚の振動特性について考察を行うために、15Hz 近傍のモードについて検討を行う。15Hz 近傍の関連振動モードは図 4 に示す通り、橋脚の橋軸直角方向の振動モードであると考えられる。

常時微動データからの振動同定の精度を向上させるためにベイズ同定を適用する。データ長は1分である。本研究ではベイズ同定を適用する範囲として対策前の橋脚の固有振動数として推定された 15.9Hz 付近の振動数、すなわち 14~17Hz の範囲に絞り振動同定を行う。平常時・増水時のそれぞれの同定振動数の推定結果の分布を図 5、図 6 に示す。平常時において、橋脚の対策前は 16.4Hz 近傍と 14.5Hz 近傍で卓越していることがわかる。対策後においては 16.4Hz 近傍での卓越はみられず 14.5Hz 近傍での卓越のみとなっている。補強によって 16Hz 近傍の振動数に対応する橋脚橋軸直角方向のモードの揺れが抑えられたと考えられる。増水時においては、橋脚の対策前は増水前後で同定振動数の分布図が大きく変わっており、増水により橋脚の 15.7Hz の振動が卓越することがわかる。一方、補強によって、同定振動数の分布に大きな変化はなく、増水による 15.7Hz の卓越振動数の出現は観測されず洗掘対策の効果が現れたと考えられる。

5. 結論

橋脚の洗掘対策前後における PSD を比較すると 15Hz 近傍で橋脚の対策後のパワーが減少していることが分かる。このことは対策前の橋脚の横揺れが抑えられていることを意味しており、洗掘対策の効果を間接的に示している。常時微動データの振動同定精度の向上を狙ったベイズ同定から以下の結果が得られた。対策前においては平常時および増水時の比較を行うと振動特性が大きく変化している。しかし、対策後の平常時と増水時の振動数分布を比較すると、同定振動数の分布に大きな変化がみられず、洗掘対策後は増水による 15.7Hz の卓越振動数の出現はなく、洗掘対策の効果を間接的に把握することができた。

表 1 対象橋脚の洗掘対策前の振動特性。

卓越振動数	モード形状
4.8Hz	橋桁水平モード
10.5Hz	橋桁ねじれモード
15.4Hz	橋脚橋軸直角モード
29.3Hz	橋脚鉛直モード

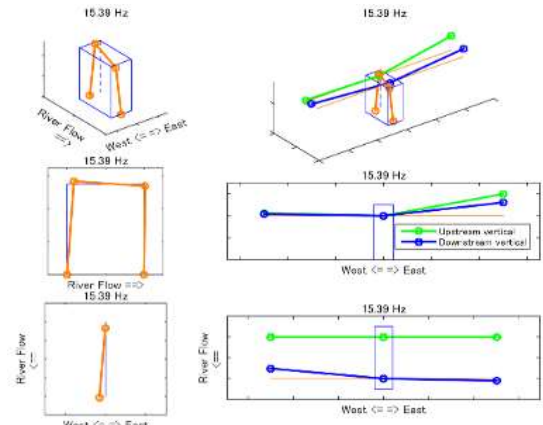


図 4 15.39Hz でのモード形状(対策前)：左上から順に橋脚鳥瞰図、橋脚正面図、橋脚平面図；右上から順に橋梁鳥瞰図、橋梁側面図、橋梁平面図。

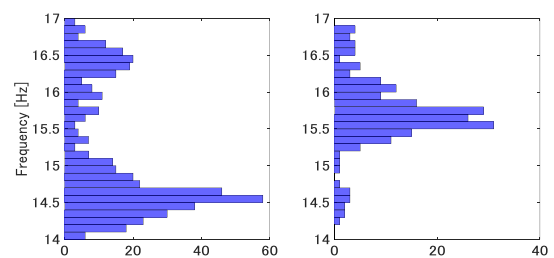


図 5 左側が平常時、右側が増水時の 14~17Hz での同定振動数の分布図 (対策前 2016 年 8 月)。

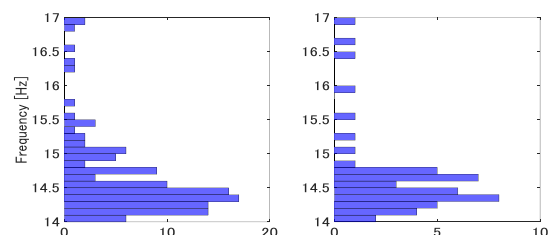


図 6 左側が平常時、右側が増水時の 14~17Hz での同定振動数の分布図 (対策後 2017 年 8 月)。

【参考文献】1) 佐溝昌彦, 輿水聡, 森泰樹, 渡邊諭: 洗掘災害発生要因の分析と洗掘要注意橋りょう抽出手法, 鉄道総研報告, Vol.23, No.3, 2009. 2) Au, S.K., Zhang, F.L. and Ni, Y.C.: Bayesian operational modal analysis: theory, computation, practice. Computers & Structures, Vol.126, pp. 3-14, 2013. 3) 五井良直・金 哲佑・Au, S.K.: 統計的不確かさを考慮したベイズ推定による長大斜張橋の振動モード同定に関する検討, 土木学会論文集 A2, Vol.72, No.2, pp.I_751-I_762, 2016. 4) 河邊大剛: 振動モニタリングによる鉄道橋橋脚の洗掘評価に関する研究, 京都大学修士論文, 2017. 2.